

О ТЕПЛОВОМ УБЕГАНИИ АТМОСФЕРЫ π MEN c

Е. С. Калиничева, В. И. Шематович, Я. Н. Павлюченков

Институт астрономии Российской академии наук

В данной работе представлены результаты моделирования верхней атмосферы экзопланеты π Men c, выполненные с помощью ранее разработанной одномерной самосогласованной аэрономической модели. Используемая модель учитывает вклад надтепловых частиц, что значительно уточняет функцию нагрева атмосферы. Получены высотные профили температуры, скорости и плотности, рассчитан темп потери атмосферы. Обнаружено присутствие двух шкал высоты в структуре атмосферы: первая отвечает относительно плотной стационарной атмосфере, вторая — более разреженной короне.

ON THE THERMAL ATMOSPHERIC ESCAPE OF π MEN c

E. S. Kalinicheva, V. I. Shematovich, Ya. N. Pavlyuchenkov

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

In this work we present the results of the modeling of exoplanet π Men c upper atmosphere, produced using the previously developed one-dimensional self-consistent aeronomic model. The model used takes into account the contribution of suprathermal particles, which significantly refines the heating function of the atmosphere. The height profiles of temperature, velocity and density were obtained, the atmospheric mass-loss rate was calculated. The presence of two height-scales in the structure of the atmosphere was found: the first corresponds to a relatively dense stationary atmosphere, the second to a more rarefied corona.

Введение

В настоящее время известно уже более четырех тысяч экзопланет. Особую группу среди них составляют планеты с протяженными водородгелиевыми атмосферами, многие из них находятся на очень низких орбитах (расположены очень близко к своей звезде), из-за чего их атмосферы подвержены воздействию больших потоков звездного излучения в диапазонах мягкого рентгена и жесткого ультрафиолета (XUV-излучения). Такое жесткое излучение нагревает атмосферу и вызывает у таких планет гидродинамический отток или убежание газовой оболочки, состоящей из легких элементов [1]. Описанное явление наблюдается посредством транзитной спектроскопии у нескольких близких систем с горячими юпитерами, суперземлями и субнептунами. Горячие юпитеры — это внесолнечные планеты с массами и радиусами порядка соответствующих параметров планеты Юпитер в Солнечной системе, но находящиеся на гораздо более низких орбитах (до 0.1 а. е.). Аналогичным образом определяются горячие нептун (параметры порядка соответствующих значений для Нептуна из Солнечной системы). Суперземли — это планеты, чей радиус попадает в диапазон от 1.25 до 2 радиусов Земли. Температуры на уровне термосферы у горячих планет очень велики (до нескольких тысяч кельвин), это повышение температуры вызвано описанным выше поглощением потока излучения в диапазоне XUV от родительской звезды.

Несмотря на обнаружение большого числа внесолнечных юпитеров и суперземель на близких к родительской звезде орбитах, количество горячих непунов (0.6–18 масс Нептуна, орбитальный период меньше трех дней) оказалось очень незначительным. Соответствующая область на диаграмме масса—период названа «пустыней горячих непунов» или

пустыней короткопериодических непутов [2]. Общепринятое объяснение этому явлению состоит в том, что такие планеты не обладают достаточной массой, чтобы удержать свою газовую оболочку, которая теряется под действием XUV-излучения родительской звезды. В [3] был сделан вывод, что наличие пустыни горячих непутов не может объясняться только лишь потерей атмосферы за счет жесткого излучения родительской звезды. В исследовании был сделан вывод, что в случае относительно маломассивных горячих непутов оценка верхнего предела оттока массы совпадает с оценками [1] уровня фотониспарения атмосферы. В случае же более массивных горячих непутов подобный механизм не приводит к потере значительной доли атмосферы.

Первой экзопланетой, открытой с помощью спутника TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), стала небольшая планета у яркой звезды солнечного типа π Men (HD 39091), также имеющей планету-гиганта на удаленной орбите. Планета π Men с классифицируется как суперземля. Благодаря яркости звезды масса и радиус планеты были измерены с высокой точностью и равны соответственно $M = 4.52 \pm 0.81 M_{Earth}$ и $R = 2.06 \pm 0.03 R_{Earth}$ [4]. В [5] на основе архивных данных наблюдений ROSAT и Swift было показано, что в части мягкого рентгена и жесткого ультрафиолета спектр родительской звезды π Men повторяет солнечный, а также посчитан темп потери атмосферы π Men c. В [6] обсуждается вопрос о концентрации и роли водорода и более тяжелых элементов в атмосфере π Men c.

Описание модели

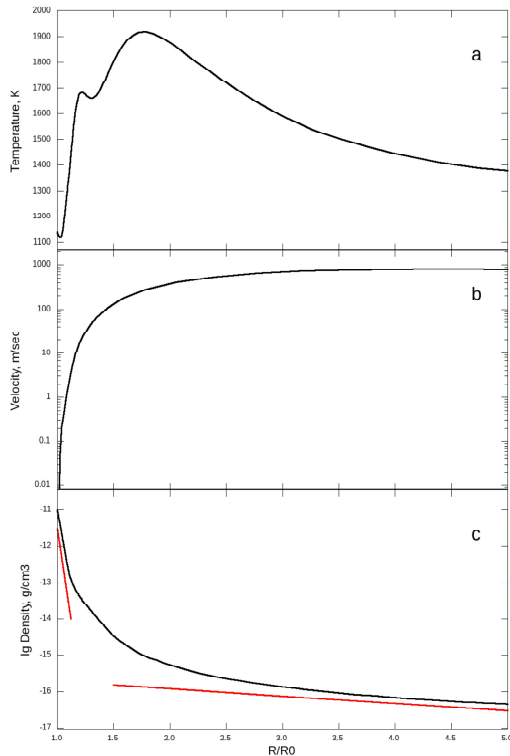
В данной работе с помощью самосогласованной одномерной астрономической модели водородгелиевой атмосферы, включающей надтепловые электроны [7], выполнено моделирование газовой оболочки планеты π Men c (HD 39091c). В сравнении с другими одномерными моделям данная модель имеет преимущество в виде учета вклада надтепловых частиц, что приводит к более аккуратному расчету уровня нагрева атмосферы и соответственно к уточнению темпа ее оттока. Наибольший вклад учета надтепловых частиц заметен при моделировании горячих экзопланет (расположенных очень близко к родительской звезде). Высокоэнергетичное излучение нагревает верхнюю атмосферу, ионизируя атомарный водород и гелий, часть энергии этого излучения переходит в кинетическую энергию продуктов реакции. Обычно, если энергия образовавшегося фотоэлектрона превышает тепловую на несколько порядков величины (над- или сверхтепловая частица), то он может вступить во вторичную реакцию ионизации или возбуждения других частиц атмосферы. При этом кинетическая энергия, которую надтепловой электрон имел изначально, расходуется преимущественно на ионизацию и диссоциацию H_2 -H-He, а не на прямой нагрев атмосферного газа. Учет описанных процессов вносит существенный вклад в динамику и энергетику экзопланетной атмосферы [3, 7]. Расчеты велись в направлении на родительскую звезду. В качестве отправной точки была выбрана гидростатическая атмосфера из молекулярного водорода (85 %) и гелия (15 %) толщиной 0.4 фотометрических радиуса планеты ($R_0 = 2.06 \pm 0.03 R_{Earth}$) с постоянной температурой 1 147 K и экспоненциальным спадом плотности. Расчетная сетка состоит из 500 ячеек и имеет сгущение к внешнему краю, в качестве граничного условия выбрано постоянное давление на внешней ячейке, имитирующее давление ветра от родительской звезды.

Результаты

На рисунке приведены результаты расчетов — высотные профили температуры (a), скорости (b) и плотности (c) атмосферы π Men c. Как видно из приведенных графиков, максимум температуры достигает приблизительно 1 900 K, а газодинамическая скорость не

превышает 1 км/с. Наиболее интересным является третий график, отражающий наличие двусоставной структуры атмосферы планеты. Нижние слои (1–1.2 R₀) образуют относительно плотную стационарную атмосферу, в то время как верхние (> 1.5 R₀) принадлежат протяженной экзопланетной короне, состоящей из куда более разреженного газа.

Также был посчитан темп оттока атмосферы, по нашим данным, он составляет около $\dot{M} = 1.9 \times 10^9$ г/с, что значительно меньше результатов, обсуждаемых в [5]. Этот результат является ожидаемым, так как учет вклада надтепловых частиц, реализованный в нашей модели, позволяет получить более аккуратный расчет нагрева атмосферы, уменьшенный по сравнению с результатами более простых моделей. Следует заметить, что в [5] подчеркивается, что темп оттока атмосферы π Men с должен превосходить соответствующую величину для горячего нептона GJ 436 b. В [8] приведена оценка темпа оттока GJ 436 b, сделанная с помощью описанной в данной работе модели, она составила около $\dot{M} = 1.6 \times 10^9$ г/с. Таким образом, если сравнивать между собой оценки темпа потери атмосферы, сделанные с помощью одной и той же модели, учитывающей вклад надтепловых частиц, можно заключить, что по величине темпа потери массы суперземля π Men с превосходит горячий нептун GJ 436 b.



Высотные профили температуры, скорости и плотности атмосферы π Men с

Заключение

Первая подтвержденная экзопланета из миссии TESS, π Men c, — суперземля, вращающаяся вокруг яркой звезды солнечного типа. В данной работе представлены высотные профили температуры, скорости и плотности атмосферы этой планеты, полученные с помощью одномерной самосогласованной аэрономической модели с учетом вклада надтепловых частиц. Обнаружена двухуровневая структура атмосферы: небольшая стационарная часть и протяженная корона. Установлено, что темп потери массы, полученный в данной работе, существенно снижен по сравнению с работами других авторов.

Исследование Е. С. Калиничевой выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90149. Работа В. И. Шематовича выполнена в рамках проекта «Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение № 075-15-2019-1875).

Библиографические ссылки

- [1] *Owen J. E.* Atmospheric Escape and the Evolution of Close-In Exoplanets // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences.* — 2019. — Vol. 47.
- [2] *Mazeh T., Holczer T., Faigler S.* Dearth of short-period Neptunian exoplanets: A desert in period-mass and period-radius planes // *Astronomy & Astrophysics.* — 2016. — Vol. 589.
- [3] *Ionov D. E., Pavlyuchenkov Ya. N., Shematovich V. I.* Survival of a planet in short-period Neptunian desert under effect of photo-evaporation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2018. — Vol. 476.
- [4] *Gandolfi D., Barragán O., Livingston J. H. et al.* TESS's first planet. A super-Earth transiting the naked-eye star π Mensae // *Astronomy & Astrophysics.* — 2018. — Vol. 619.
- [5] *King G. W., Wheatley P. J., Bourrier V., Ehrenreich D.* The XUV irradiation and likely atmospheric escape of the super-Earth π Men c // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters.* — 2019. — Vol. 484.
- [6] *Shaikhislamov I. F., Fossati L., Khodachenko M. L. et al.* Three-dimensional hydrodynamic simulations of the upper atmosphere of π Men c: Comparison with Ly α transit observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters.* — 2020. — Vol. 639.
- [7] *Ionov D. E., Shematovich V. I., Pavlyuchenkov Ya. N.* Influence of Photoelectrons on the Structure and Dynamics of the Upper Atmosphere of a Hot Jupiter // *Astronomy Reports.* — 2017. — Vol. 61.
- [8] *Kalinicheva E., Shematovich V., Pavlyuchenkov Y.* About the Atmospheric Loss of Hot Neptune GJ 436b // *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century : Proceedings of the All-Russian Conference, Nizhny Arkhyz, Russia, September 21–25, 2020.* — Nizhny Arkhyz : Special Astrophysical Observatory (SAO RAS), 2020. — P. 4.